

# Conformação Plástica dos Metais

# Conformação:

- É o processo de transformação dos materiais (metálicos), através da ação de tensões mecânicas sem que haja remoção de material;
- A modificação ocorre na forma, na dimensão e nas propriedades físicas dos materiais.

# Propriedades de Interesse

Melhora - propriedades mecânicas:

- Resistência à Tração;
- Dureza;
- Tenacidade;

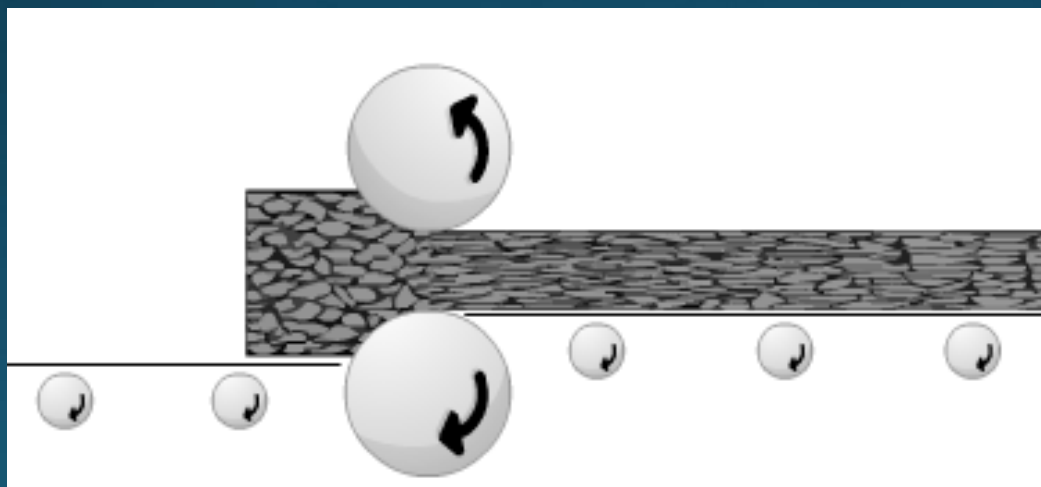
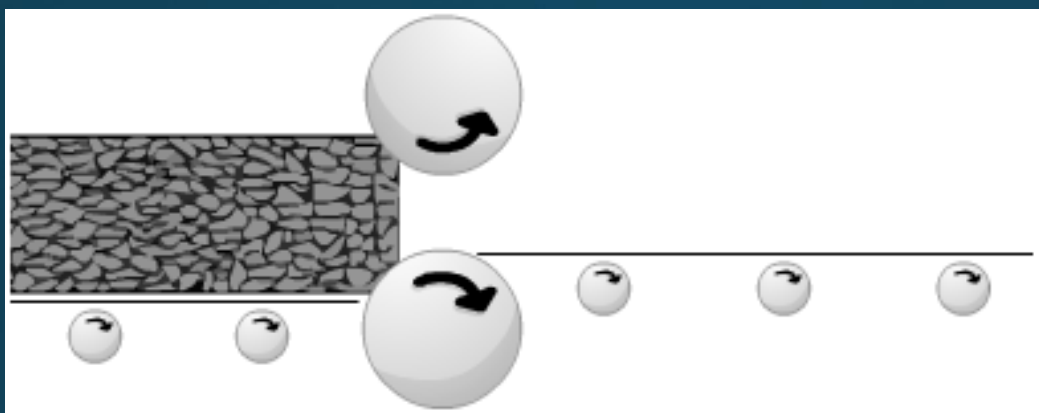
# Características serão função:

- **da matéria prima utilizada:**
  - composição química;
  - estrutura metalúrgica (natureza, tamanho, forma);
- **das condições impostas pelo processo:**
  - o tipo e o grau de deformação;
  - a velocidade de deformação;
  - a temperatura em que o material é deformado.

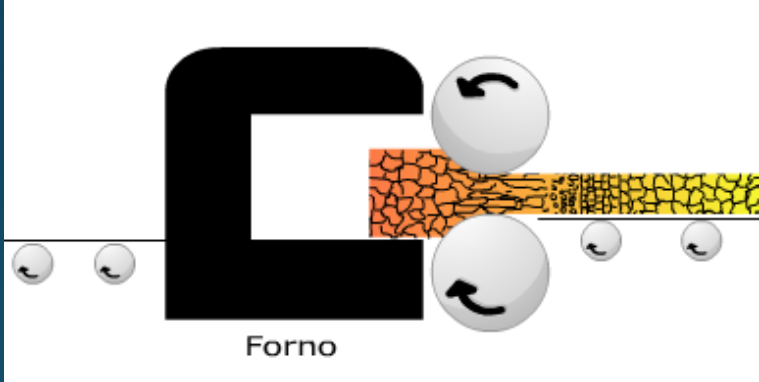
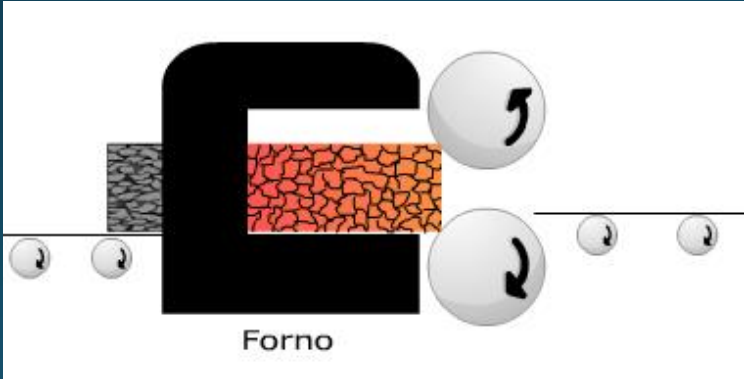
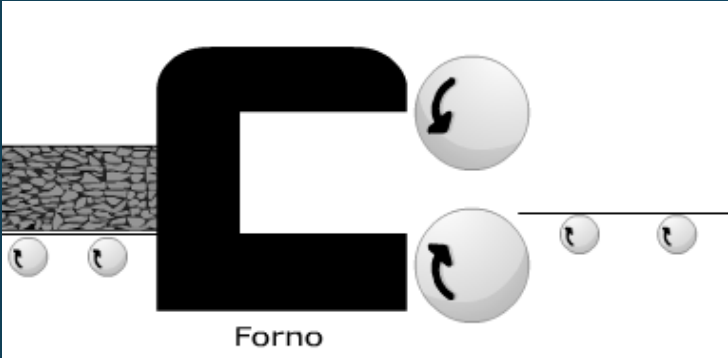
# Influência da Temperatura

- **A QUENTE** - aquele que é executado em temperaturas acima de  $0,5T_f$
- **A MORNADO** - executado na faixa compreendida (grosseiramente) entre  $0,3$  e  $0,5 T_f$
- **A FRIO** - aquele que é executado entre  $0$  e  $0,3 T_f$

# A Frio



# A Quente



# Tipos de processo de deformação

## 1. Deformação Volumétrica

- Laminação
- Forjamento
- Extrusão
- Trefilação de barras e fios

## 2. Deformação na chapa

- Conformação de Chapas
- Dobra
- Estampagem profunda
- Corte
- Processos miscelânea

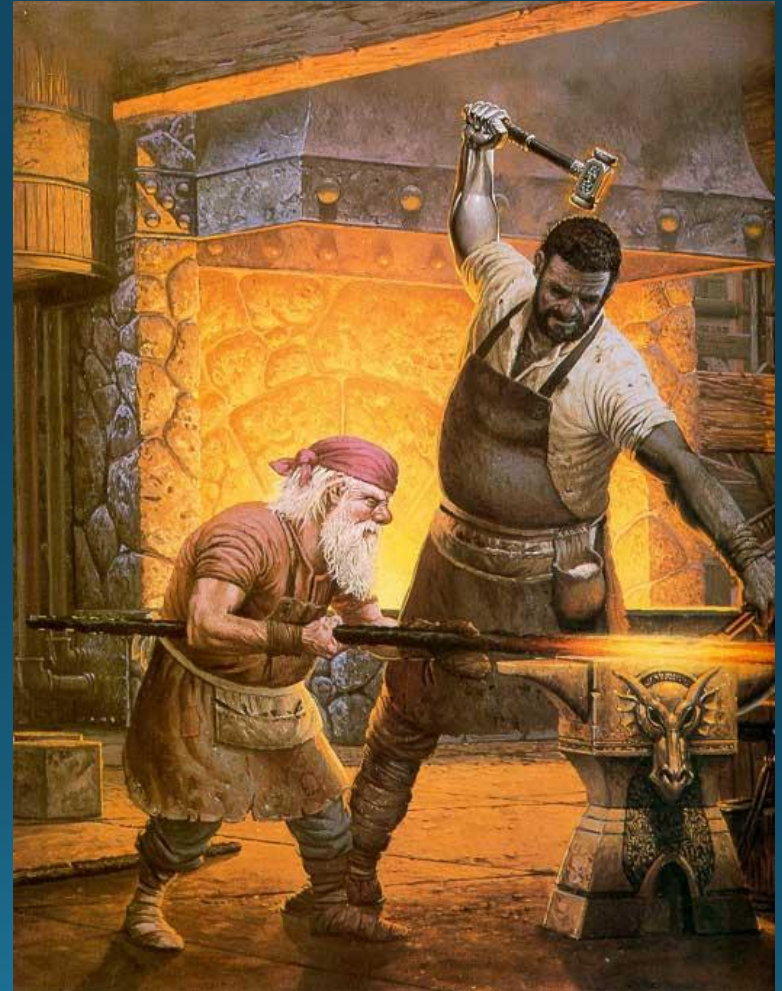


# Principais processos de conformação

O forjamento - a alteração de forma é realizada através de forças de compressão exercidas por ferramentas atuadas por martelos de queda ou por prensas hidráulicas, mecânicas, ou de fricção.

A tecnologia do forjamento permite fabricar peças com dimensões e formas geométricas muito diversificadas numa gama muito variada de materiais metálicos.

O campo de aplicação desta tecnologia estende-se a um conjunto de indústrias muito vasto, das quais se destacam pela sua importância; a dos transportes (automóvel, aeronáutica, ferroviária e naval), a militar, a fabricação de maquinaria industrial e a de produção de energia.



# Forjamento

Aplicações

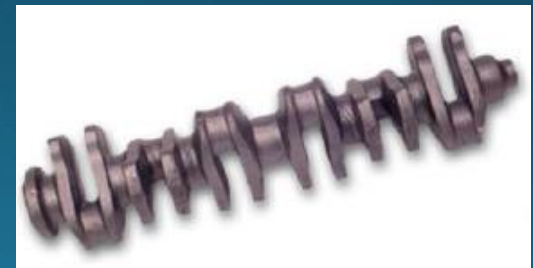
Indústria de  
automóveis

Aeroespacial

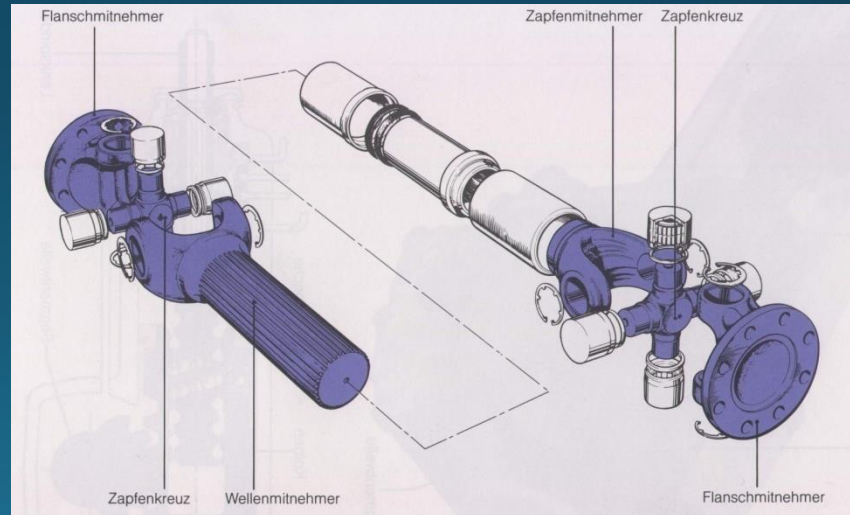
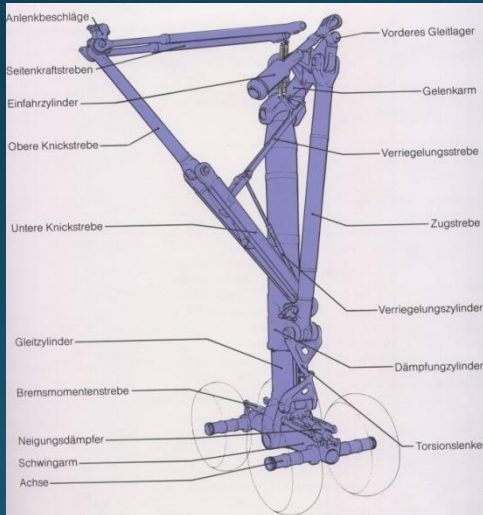
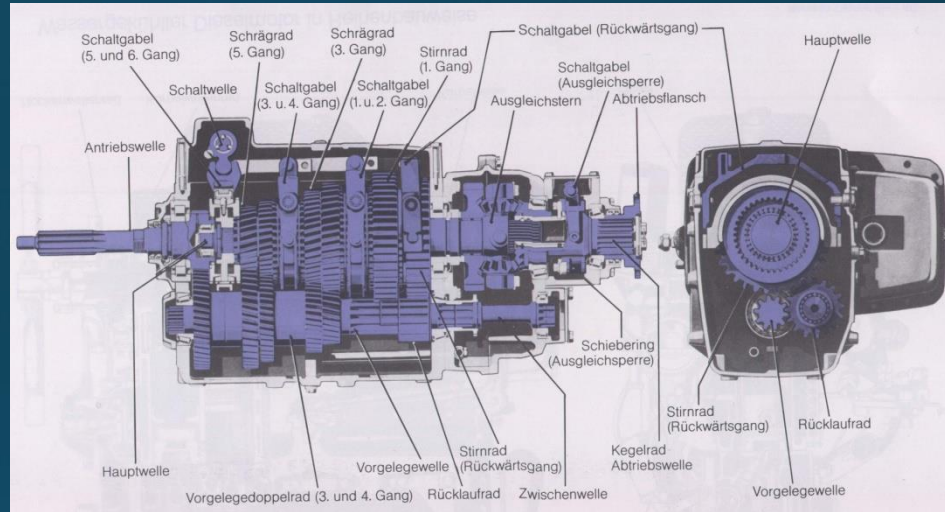
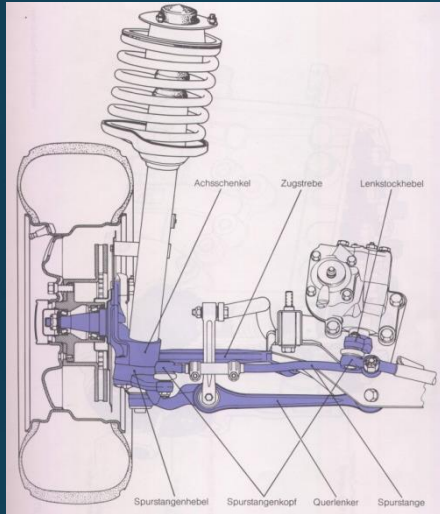
Militar

Agrícola

Mineira



## Exemplos de aplicação de peças forjadas em automóveis, caminhões e aviões.





# Forjamento

Peças forjadas em um automóvel (250 peças):

**Componentes do motor:** Válvulas, árvore de cames, bielas, etc.

**Componentes da transmissão:** Engrenagens cônicas, anéis sincronizadores, juntas, eixos, cubos de embreagem, etc.

**Componentes do chassis e da suspensão:** Cubos da roda, braços e triângulos de suspensão, etc.

**Componentes da direção:** Colunas, rótulas, barras de torção, eixos de direção, etc.

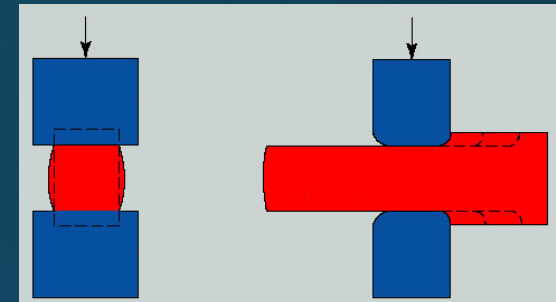
# Classificação dos processos de forjamento

Os processos de forjamento podem ser classificados com base no tipo de ferramenta que trabalha a peça:

## Forjamento em matriz aberta

O escoamento do material não é, ou é apenas ligeiramente, constringido lateralmente.

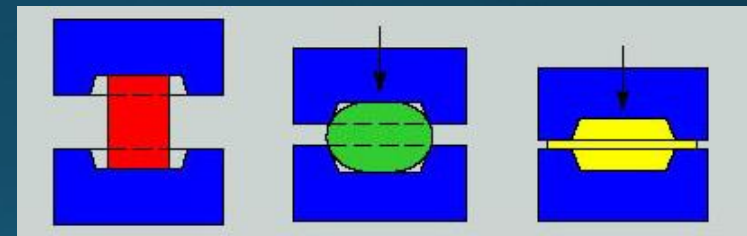
As ferramentas possuem geometrias simples.



## Forjamento em matriz fechada

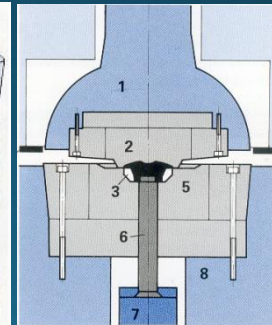
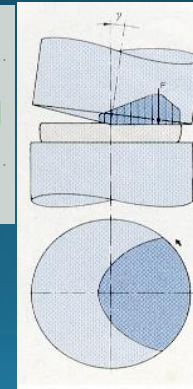
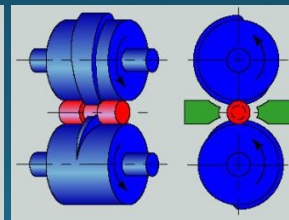
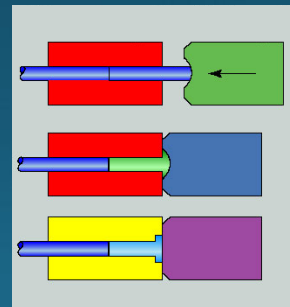
O escoamento do material é constringido lateralmente.

As ferramentas possuem a forma negativa da peça a fabricar.

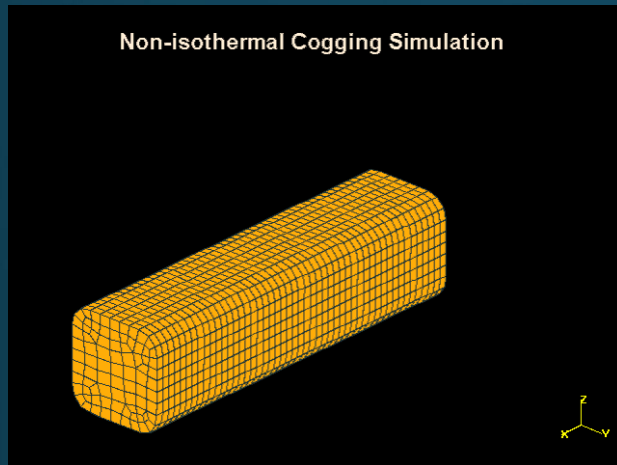


## Outros tipos de forjamento

Compressão axial (ou recalçagem),  
Forjamento por intermédio de rolos,  
Forjamento orbital e rotativo.



# Forjamento em matriz aberta



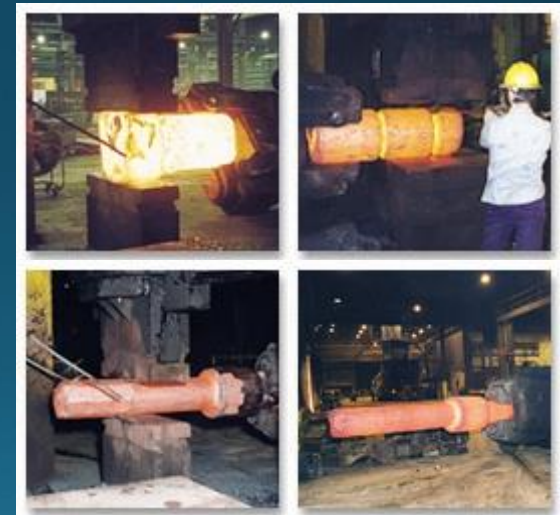
As ferramentas possuem geometrias simples e aplicam forças de compressão localizadas. O constrangimento lateral é pequeno o ou, muitas vezes, inexistente. A forma final da peça é obtida por intermédio da manipulação da matéria-prima entre golpes sucessivos.

## Principais vantagens:

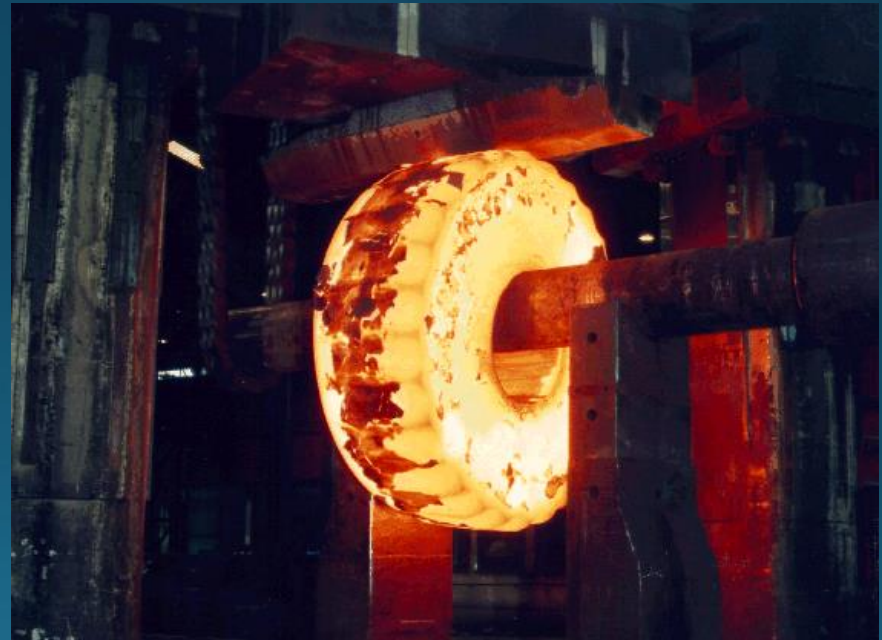
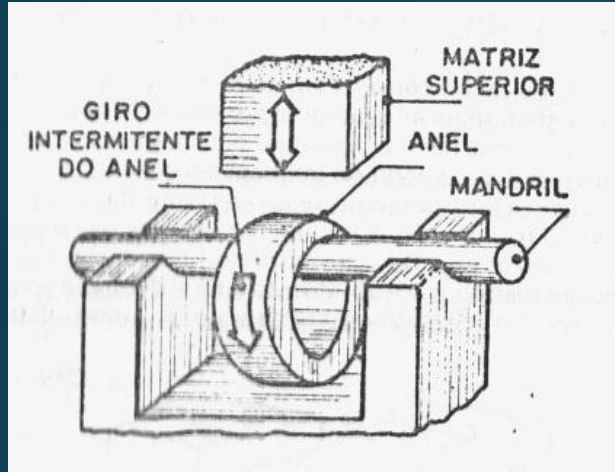
- i) Baixo custo de operação.
- ii) A geometria das ferramentas não depende das peças a forjar.
  - a) Aplicabilidade adequada à fabricação de pequenas séries.
  - b) Adequabilidade à fabricação de peças com dimensões, geometrias e pesos muito variados.
- iii) Excelentes propriedades mecânicas (resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga).

## Principais desvantagens e limitações:

- i) Apenas pode ser aplicado a formas geométricas simples.
- ii) Não permite obter tolerâncias de fabricação apertadas. A geometria final das peças é obtida por forjamento em matriz fechada ou usinagem.
- iii) Possui uma cadência de produção baixa.
- iv) Necessita de operários especializados e com algum grau de perícia.



# Forjamento em matriz fechada aberta





# Forjamento em matriz fechada

O material é disponibilizado na forma de varão ou barra.

A pré-forma obtém-se por corte do varão ou barra e a sua geometria tem de assegurar o enchimento completo das cavidades das matrizes.

As matrizes possuem a forma negativa das peças a fabricar de modo a constrangerem a deformação plástica da pré-forma.

## Forjamento convencional

Destinado ao fabricação de peças com rebarba.

A complexidade de forma e as tolerâncias geométricas das peças enquadram-se nos padrões gerais de fabricação.



## Forjamento de precisão

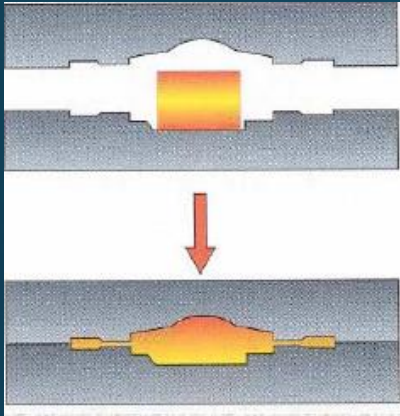
Destinado à fabricação de peças na forma final ou quase final, sem rebarba significativa.

As tolerâncias geométricas das peças são bastante mais apertadas do que as habitualmente utilizadas no forjamento convencional.

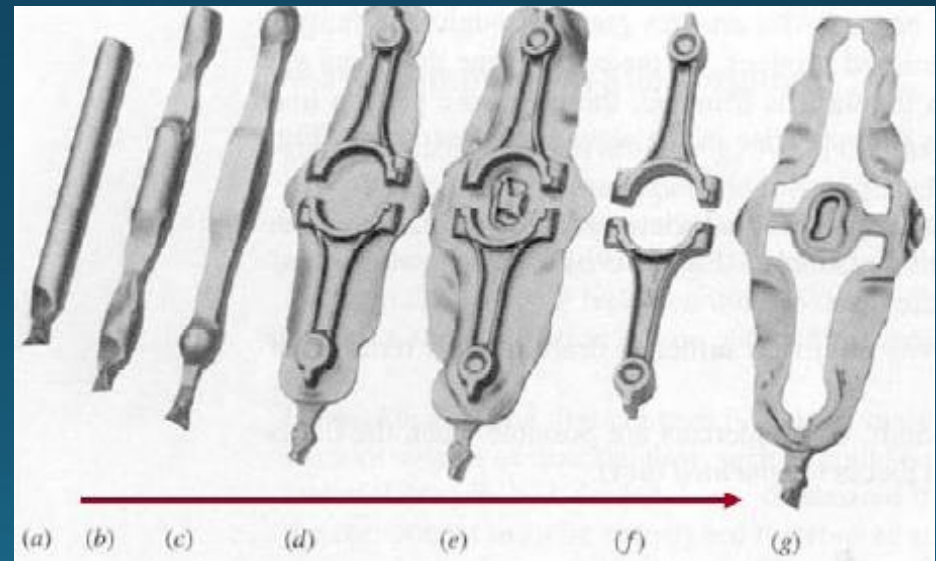




# Forjamento em matriz fechada



Seqüência de fabricação de uma biela.

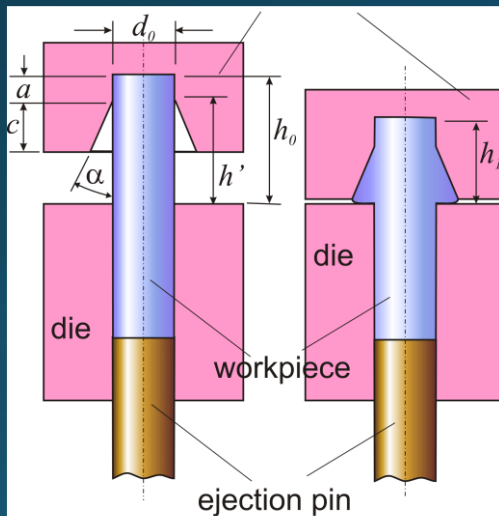


## Outros tipos de forjamento

A compressão axial (recalcagem ou encabeçamento) - utilizada na fabricação de parafusos e rebites.



Defeitos característicos



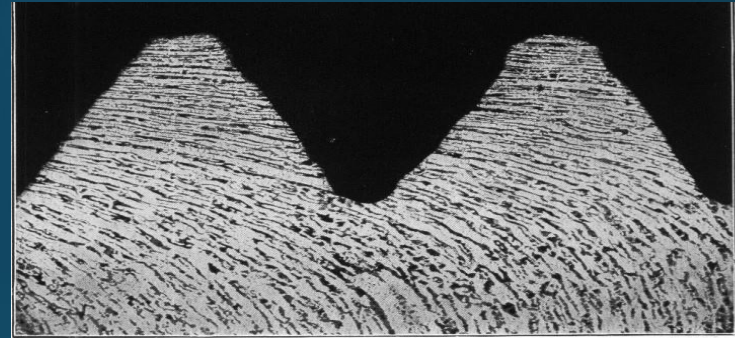
| Upsetting ratio<br>$h_0/d_0$ | Cone angle<br>$2\alpha$ (deg.) | Guide length<br>$a$ (mm) | Conical portion<br>$c$ (mm) |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 2.5                          | 15                             | $0.6 d_0$                | $1.37 d_0$                  |
| 3.3                          | 15                             | $1.0 d_0$                | $1.56 d_0$                  |
| 3.9                          | 15                             | $1.4 d_0$                | $1.66 d_0$                  |
| 4.3                          | 20                             | $1.7 d_0$                | $1.56 d_0$                  |
| 4.5                          | 25                             | $1.9 d_0$                | $1.45 d_0$                  |

# Vantagens do forjamento

- **Melhoria da microestrutura**
- **Resistência maior**
- **Melhor acabamento que a fundição.**
- **Melhor distribuição das fibras**

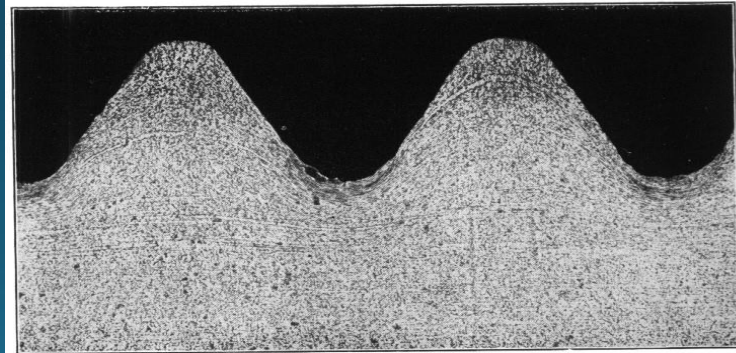
# Porque forjar?

Rosca usinada.



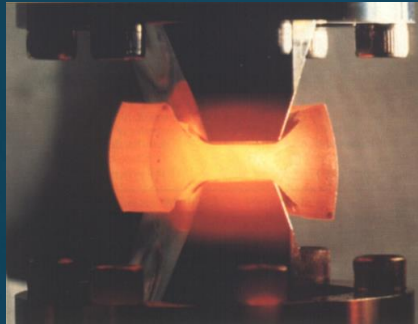
— Filetes de rosca de porca. Nota-se, pela deformação da textura a'inhada que o furo central da porca foi estampado (da direita para a esquerda) e depois se processou o corte dos filetes com macho. Ataque: nítrico. 23 x.

Rosca produzida por forjamento.



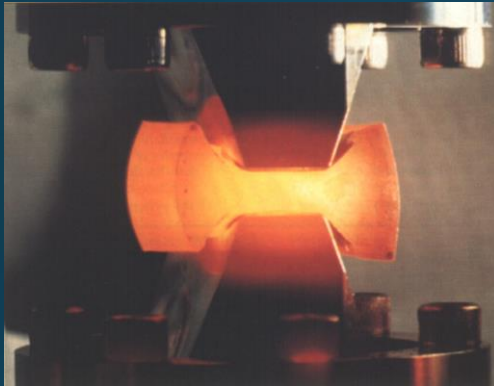
— Filetes de rosca de parafuso produzidos por rolamento. Nota-se a deformação das fibras do material por esse trabalho e também que a deformação é máxima no fundo dos filetes. Ataque: nítrico. 23 x.

# Forjados x Usinados



- Maior flexibilidade quanto ao tamanho da peça, já que não existe limitação com respeito ao tamanho da placa ou barra disponível
- Grãos orientados com respeito à forma aumentando a resistência no sentido de solicitação
- Uso mais econômico e ambiental dos materiais
- Menor número de operações

# Forjados x Sinterizados



- Mais resistentes
- Ausência de porosidade
- Maior flexibilidade no projeto
- Matéria-prima mais barata e disponível



# Forjamento a frio

Possibilita vantagens como:

- propriedades mecânicas melhoradas;
- superfície final com baixa rugosidade;
- tolerância dimensional mais fechada;
- economia de matéria-prima, já que para uma dada peça;
- o peso inicial do tarugo para esse processo de conformação é bem menor quando comparado ao forjamento a quente.

# Forjamento a quente



Corte



Forjamento a quente



Usinagem -  
Rebarbas



Acabamento



**Têmpera e revenimento** - as peças passam por transformações microestruturais, conferindo resistência à tração, flexão, dobramento e abrasão, com dureza apropriada, conforme projeto.



Jato de Granalha



Galvanoplastia





# Comparação:

| Forjamento a quente   | Forjamento a frio  |
|---|--|
| Produção de peças   | Produção de peças  |
| Grande importância técnico-econômica  | Inclui os processos:<br>- extrusão<br>- recalque<br>- cunhagem (troquelagem) |
| Tensões reduzidas<br>Pouco ou nenhum encruamento<br>Microestrutura mais homogênea   | Tensões elevadas e encruamento<br>→ alta sollicitação da ferramenta          |
| Alta forjabilidade  | Forjabilidade limitada   |
| Retrabalho de peças grandes   | Peças pequenas de aço ou metais não ferrosos                                 |
| Tolerância de fabricação de ruim a média  | Pouco retrabalho   |
| Superfície com carepa   | Boa qualidade superficial  |
| Temperaturas de forjamento:<br>Aço > 1000 C (até 1050 C)<br>Ligas de alumínio 360 C ... 520 C<br>Ligas de cobre 700 C ... 800 C |  |

# Temperatura de aquecimento da matéria prima – forjamento a frio vs. a quente

Ligas metálicas mais utilizadas em operações de forjamento a frio



Aços ao carbono  
(fosfatação / lubrificação sabão)

| Tipo de Material               | Identificação  |
|--------------------------------|--|
| Aços ao carbono e aços ligados | (AISI) 1010, 1015, 1020, 1035, 1045<br>3115<br>4130, 4140<br>5115, 5140<br>8620                                |
| Aços inoxidáveis               | (AISI) Ferríticos - 410, 430, 431<br>Austeníticos - 302, 304, 316, 321   |
| Ligas de alumínio              | (Aluminum Association) 1050, 1070, 1100, 1285<br>2017, 2024<br>3003<br>5052, 5152<br>6053, 6063, 6066<br>7075  |
| Ligas de cobre                 | Grande variedade com destaque especial para os cobsres da série C10000 e os latões das séries C20000 e C30000. |

Temperaturas recomendadas para o forjamento a quente de alguns materiais



| Material                    | Temperatura de forjamento (°C) |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Aços carbono e aços ligados | 850 – 1150                     |
| Aços inoxidáveis            | 1100 – 1250                    |
| Ligas de alumínio           | 400 – 550                      |
| Ligas de magnésio           | 250 – 350                      |
| Ligas de cobre              | 600 - 900                      |
| Ligas de titânio            | 700 - 950                      |
| Ligas de níquel             | 1000 - 1200                    |

## Forjamento a morno

Utiliza uma gama de temperaturas que permite combinar as vantagens do forjamento a frio com as do forjamento a quente.

No caso do forjamento a morno dos aços as temperaturas recomendadas variam entre os 450-850 °C sendo os limites inferior e superior condicionados pelo aumento excessivo da força (temperaturas mais baixas) e pela oxidação (temperaturas mais elevadas).

Merece igualmente destaque o fato do forjamento a morno dos aços não exigir operações de 'fosfatação e ensaboamento' e poder, em alguns casos, eliminar a necessidade de realização de tratamentos térmicos a montante e a jusante da operação.

| Peso (Kg) | Frio<br>(Produção anual) | Morno<br>(Produção anual) |
|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 0.10-0.25 | > 300.000                | > 200.000                 |
| 0.25-0.75 | > 200.000                | > 150.000                 |
| 0.75-2.5  | > 100.000                | > 25.000                  |

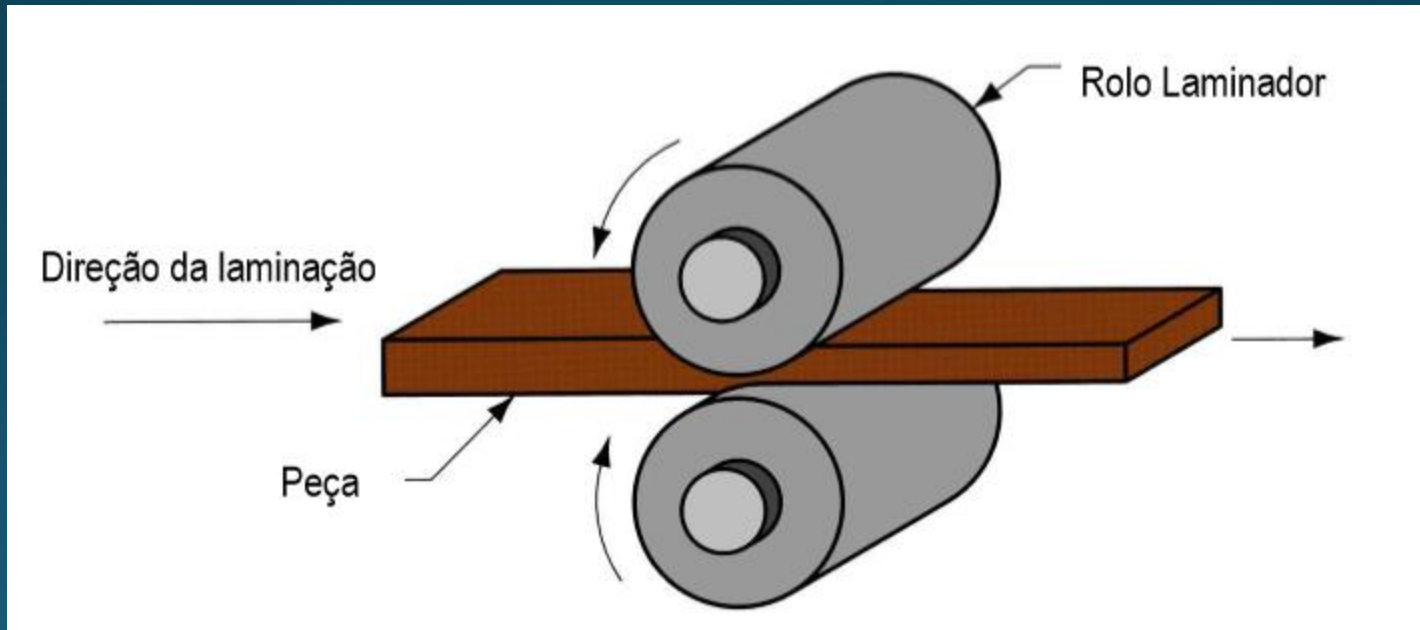
|                                       | Quente      | Morno    | Frio         |
|---------------------------------------|-------------|----------|--------------|
| Peso dos componentes (kg)             | 0.05-1500   | 0.001-50 | 0.001-30     |
| Precisão dimensional                  | IT 13-16    | IT 11-14 | IT 8-11      |
| Rugosidade (R)                        | > 50-100 µm | >30 µm   | >10 µm       |
| Tensão efectiva (em termos relativos) | 20 a 30%    | 30 a 50% | 100%         |
| Extensão efectiva máxima admissível   | < 6         | < 4      | < 1.6        |
| Custo (em termos relativos)           | 113%        | 100%     | 147%         |
| Operações de maquinagem subsequentes  | Elevadas    | Baixas   | Muito baixas |



# Laminação

Processo de Deformação no qual a espessura da peça é reduzida pela ação de forças compressivas exercidas por dois laminadores opostos

→ *diminuição da seção* → *aumento do comprimento*



## LAMINAÇÃO A QUENTE

- **Matéria-prima:** lingotes fundidos, placas e tarugos lingotados, laminados
  - preparação, “desbaste”
  - grandes deformações
  - grandes dimensões
  - geometrias complexas
  - produtos semi-acabados

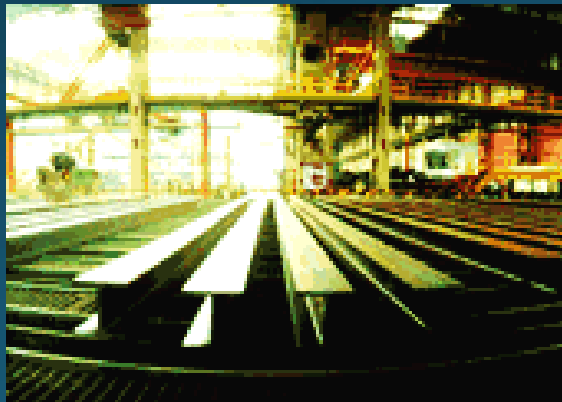
## LAMINAÇÃO A FRIO

- **Matéria-prima:** chapas e barras laminadas a quente
  - operações de acabamento
  - pequenas deformações
  - superfícies regulares
  - produtos acabados

# Configurações de laminadores

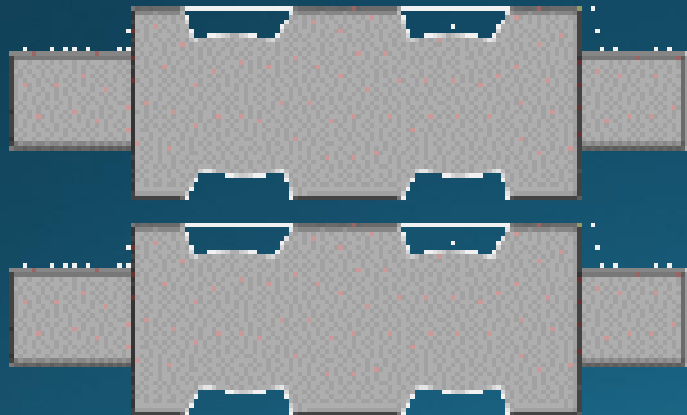
- **Duo** – dois laminadores opostos
- **Trio** – peça passa através dos laminadores passes em ambos os lados
- **Quádruo** – Laminadores maiores apoiam os laminadores menores por entre os quais a peça passa
- **Laminador com cilindros agrupados** (Sendzimir) – múltiplos laminadores de apoio sobre laminadores menores
- **Trem de Laminadores** (Tandem) ou em sequência – sequência de laminadores Duo (em torno de 8 ou dez pares de Laminadores em sequencia)

# Laminação



# Laminação

RANHURADOS



LISOS





# Laminação

## Cilindro liso



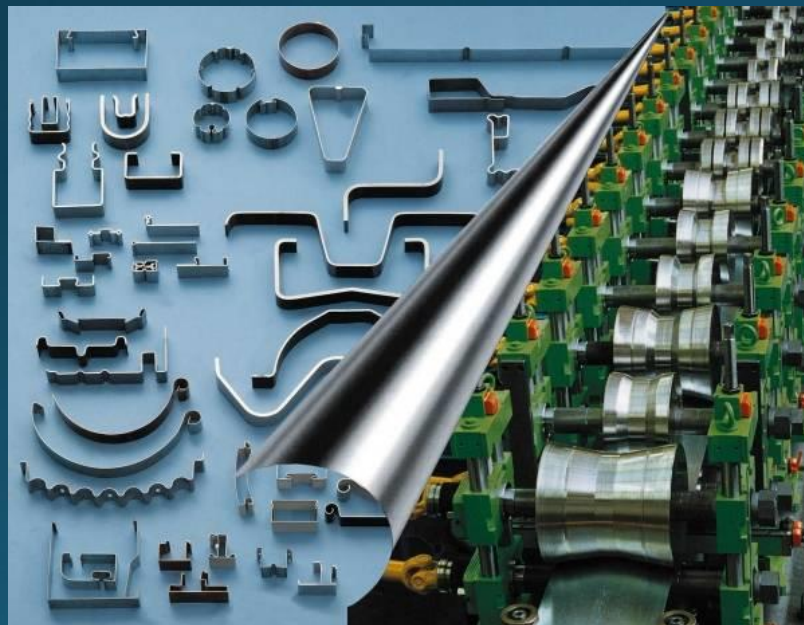
# Laminação

## Cilindro ranhurado



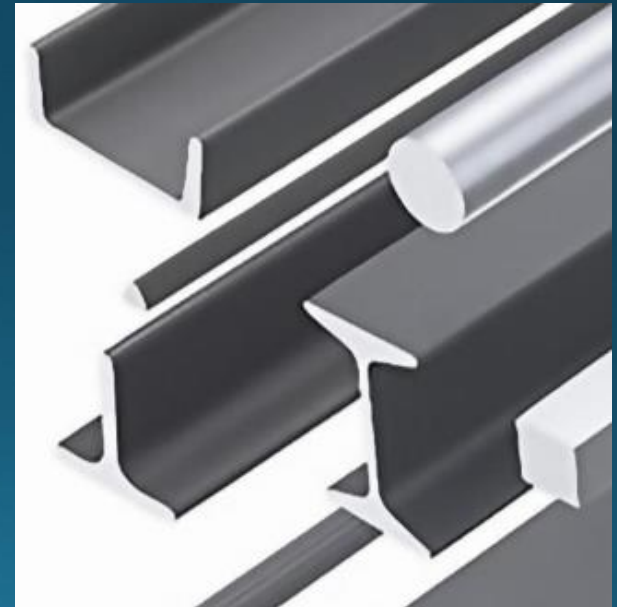
Caneluras ou passes

# Laminação



# Produtos laminados

- Perfis para construção civil tais como perfil I, L, T e canais em U
- Trilhos para estradas de ferro
- Barras e tarugos com seção circular ou quadrada



# Vantagens em relação ao corte de rosca por usinagem:

- Taxas de produção mais altas
- Melhor aproveitamento da matéria prima
- Roscas mais resistentes e com melhor resistência a fadiga devido ao encruamento

# Laminação

- Chapas finas a quente – de 1,2 a 6 mm
- Chapas finas a frio – de 0,3 a 2 mm
- Chapas galvanizadas – laminadas com revestimento protetor de zinco (por imersão em zinco fundido).
- Aços finos de seção quadrada, redonda, chata.
- Tarugos de seção quadrada, redonda, sextavada.
- Diversos tipos de perfis: T Y V L duplo T.

# Laminação

Espessuras mínimas que podem ser laminadas a partir de uma chapa de aço inox 18-8 de 3,15 mm de espessura.

| <b>Diâmetro do cilindro (mm)</b> | <b>Espessura mínima laminada (mm)</b> |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| 400                              | 0,90                                  |
| 300                              | 0,66                                  |
| 250                              | 0,58                                  |
| 200                              | 0,45                                  |
| 130                              | 0,30                                  |



# Trefilação

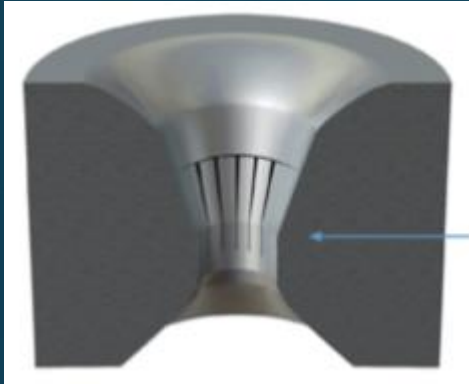
Operação em que a matéria-prima é estirada através de uma matriz em forma de canal convergente (FIEIRA ou TREFILA) por meio de uma força trativa aplicada do lado de saída da matriz. O escoamento plástico é produzido principalmente pelas forças compressivas provenientes da reação da matriz sobre o material.

**Forma resultante:** simetria circular é muito comum em peças trefiladas, mas não obrigatória.

**Condições térmicas:** normalmente a frio.



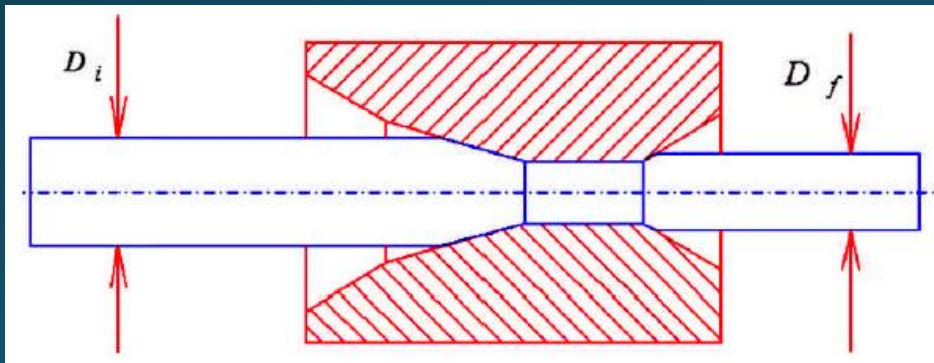
# Matriz de trefilação



# Trefilação

**Geometria da fieira:** é dividida em quatro zonas

- (1) de entrada
- (2) de redução ( $\alpha$  = ângulo de abordagem)
- (3) (guia) de calibração-zona cilíndrica (acabamento é crítico)
- (4) de saída



# Trefilação

## Produtos mais comuns:

|               |                                 |  |
|---------------|---------------------------------|--|
| <b>Barras</b> | $\phi > 25 \text{ mm}$          |  |
| <b>Arames</b> | <b>comuns</b>                   | <b>grossos</b> $25 > \phi > 5 \text{ mm}$  |
|               |                                 | <b>médios</b> $5 > \phi > 1,6 \text{ mm}$  |
|               |                                 | <b>finos</b> $1,6 > \phi > 0,7 \text{ mm}$ |
|               | <b>especiais</b>                | $0,02\text{mm} > \phi$                     |
| <b>Tubos</b>  | trefilados de diferentes formas |  |

## *Bancadas de trefilação – arames*



# Produtos de trefilação





# Extrusão

Consiste em fazer passar um tarugo ou lingote, colocado dentro de um recipiente, pela abertura existente no meio de uma ferramenta colocada na extremidade do recipiente, por meio da ação de compressão de um pistão acionado pneumática ou hidraulicamente.





# Extrusão

**Formas resultantes:** Praticamente qualquer forma de seção transversal vazada ou cheia pode ser produzida por extrusão. Como a geometria da matriz permanece inalterada, os produtos extrudados têm seção transversal constante .



# Extrusão

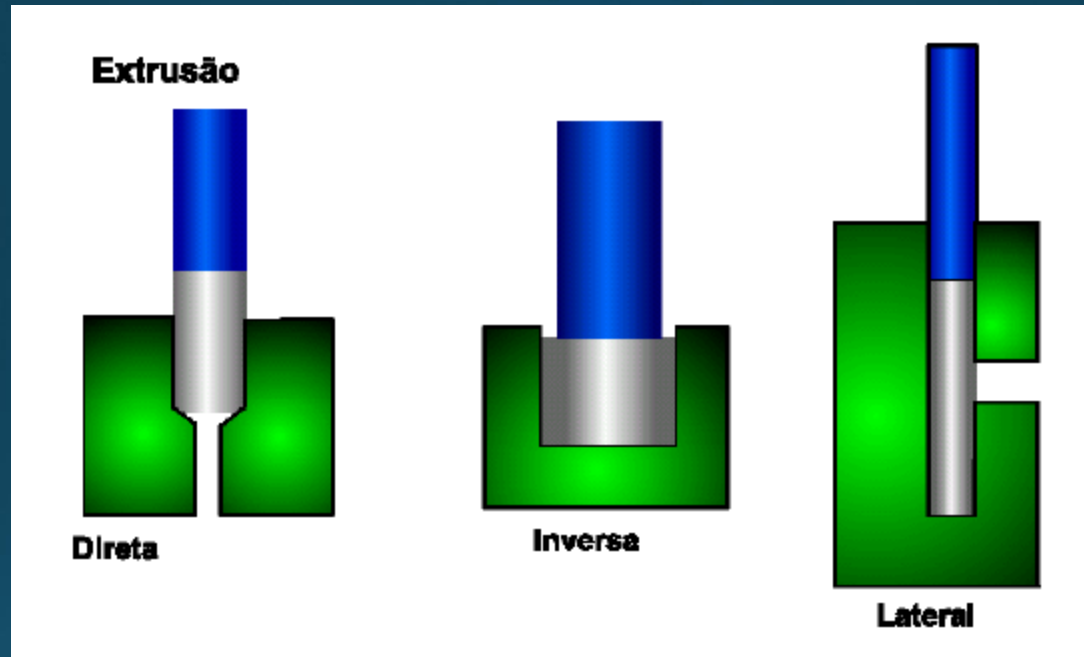


# Extrusão

**Produtos mais comuns:** quadros de janelas e portas, trilhos para portas deslizantes, tubos de várias seções transversais e formas arquitetônicas.

**Materiais:** Alumínio, cobre, aço, magnésio e chumbo são os materiais mais comumente extrudados.

# Extrusão

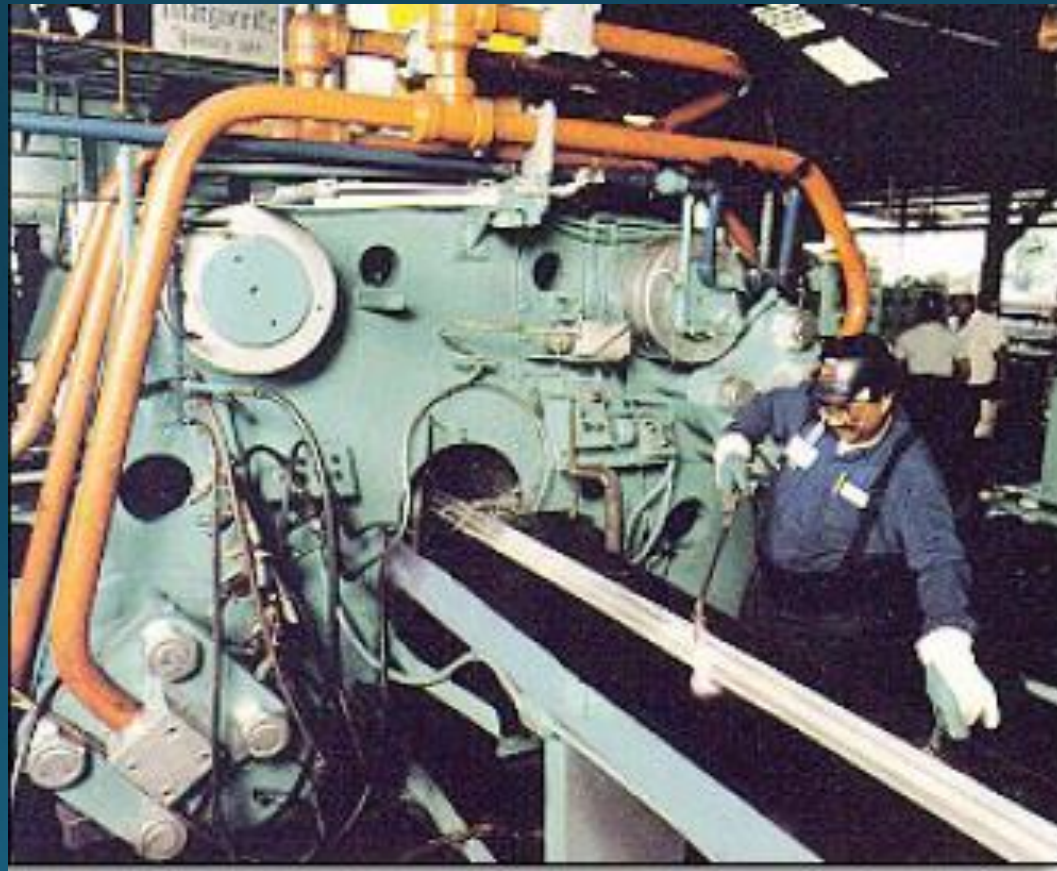


# Extrusão





# Extrusão





# Extrusão

## Matrizes de extrusão



# Extrusão

## Matrizes de extrusão



# Faixas de temperatura para extrusão

| <b>Faixas de Temperatura de Extrusão para Vários Metais</b> |                       |
|---|-----------------------|
| <b>METAL</b>  | <b>TEMPERATURA °C</b> |
| <b>Chumbo</b>   | <b>200 - 250</b>      |
| <b>Alumínio e suas Ligas</b>                                | <b>375 - 475</b>      |
| <b>Cobre e suas Ligas</b>                                   | <b>650 - 950</b>      |
| <b>Aços</b>   | <b>875 - 1300</b>     |
| <b>Ligas Refratárias</b>                                    | <b>975 - 2200</b>     |

# Conformação de chapas

- Consiste em conformar um disco plano ("blank") à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de um punção. Na operação ocorrem : alongamento e contração das dimensões de todos os elementos de volume, em três dimensões. A chapa , originalmente plana, adquire nova forma geométrica.
- **Classificação dos Processos:** estampagem profunda, corte em prensa, estiramento, etc.

# Conformação de chapas

-Normalmente realizado a frio

-Espessura da chapa de metal = 0,4 mm (1/64 pol.) a 6 mm (1/4 pol.)

Aplicações:

Fuselagens de  
aviões

Utensílios de  
cozinha

Eletrodomésticos



# Conformação chapas

*Peças cilíndricas*



*Peças retangulares*



*Peças complexas*

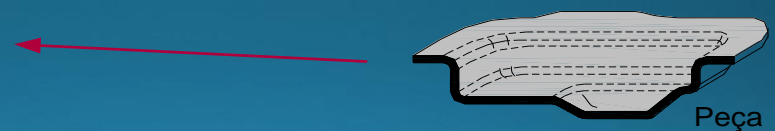
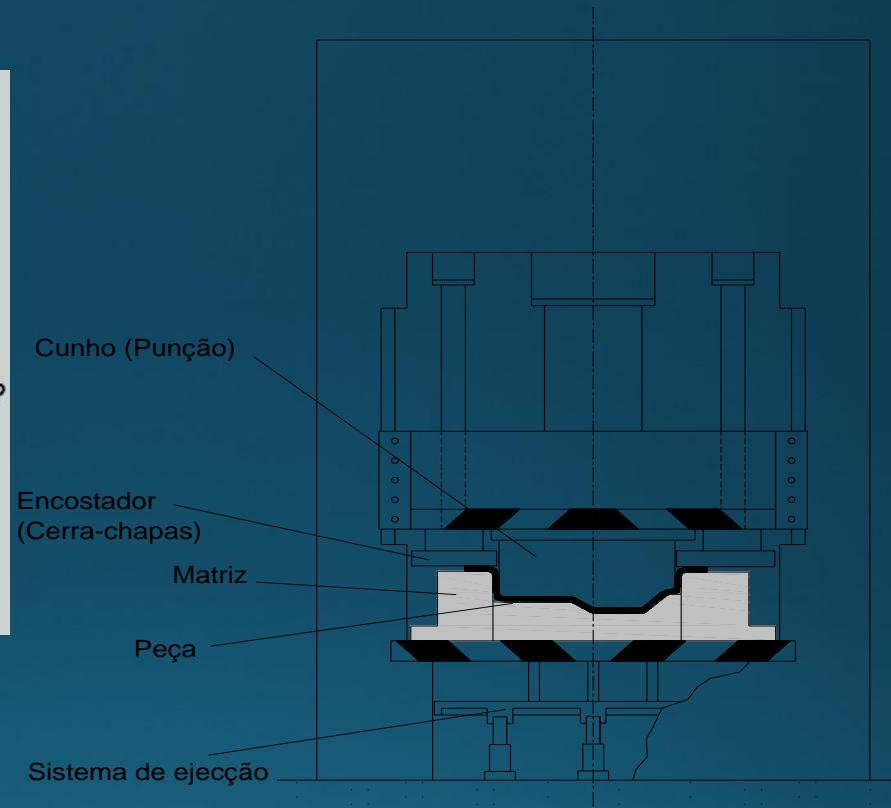
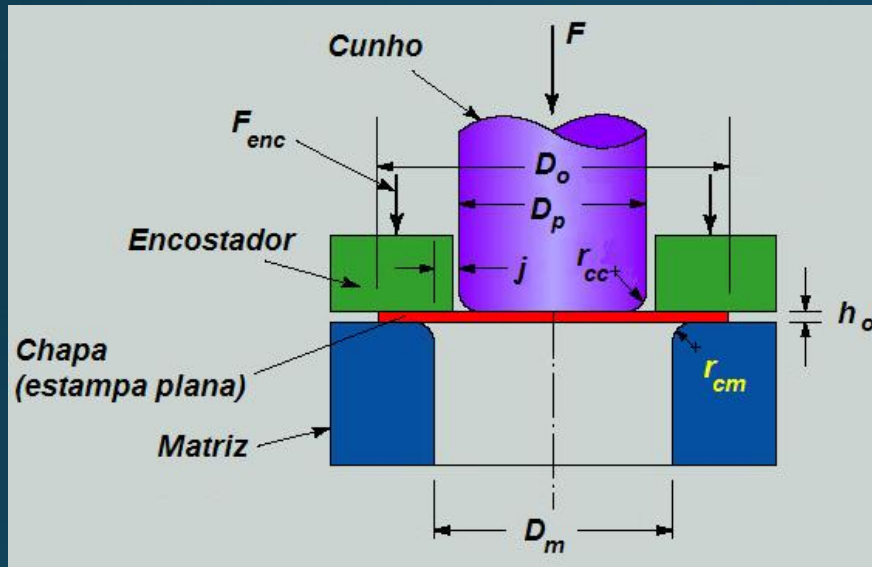




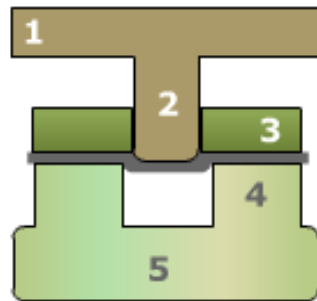
# Vantagem conformação chapas

- Alta resistência
- Boa exatidão dimensional
- Bom Acabamento
- Custo relativamente baixo
- Produção em massa considerada econômica em larga escala

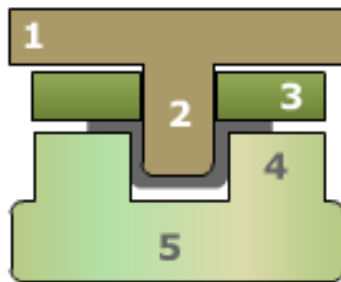
# Terminologia



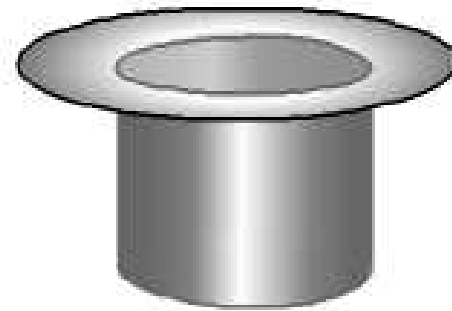
# Estampagem profunda



- 1- Suporte de punção
- 2- Punção ou penetrador
- 3- Prensa chapas ou sujeitador
- 4- Matriz
- 5- Suporte da matriz



- 1- Suporte de punção
- 2- Punção ou penetrador
- 3- Prensa chapas ou sujeitador
- 4- Matriz
- 5- Suporte da matriz



Chapa conformada

# Estampagem profunda

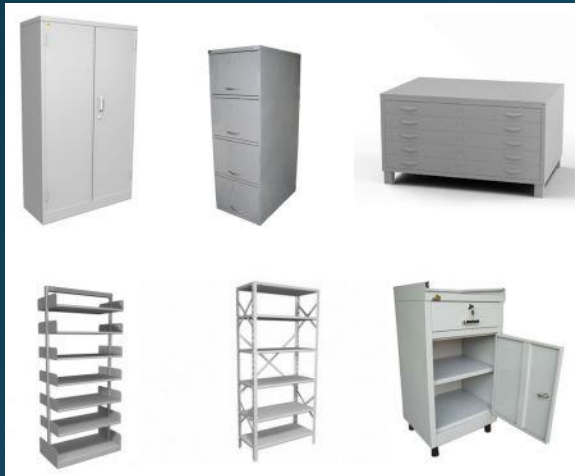


# Produto conformação chapas

- O Nissan March tem no teto uma solução interessante: dois vincos, em forma de “bumerangue”, que exercem função dupla. A principal é aumentar a rigidez da chapa de aço e a segunda, reduzir ruídos



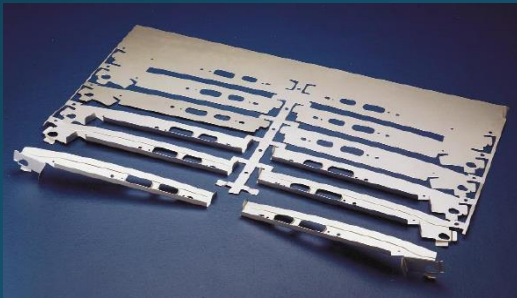
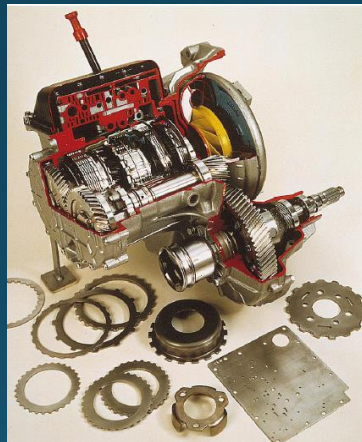
# Produto conformação chapas





# Corte de chapas

O corte - habitualmente realizado a frio, recorrendo-se ao corte a morno somente quando a espessura for elevada ou quando o comportamento mecânico do material é frágil. É um processo tecnológico que possibilita obter elevadas taxas de produção e que permite fabricar peças com uma boa precisão dimensional e um bom acabamento a um custo relativamente baixo.



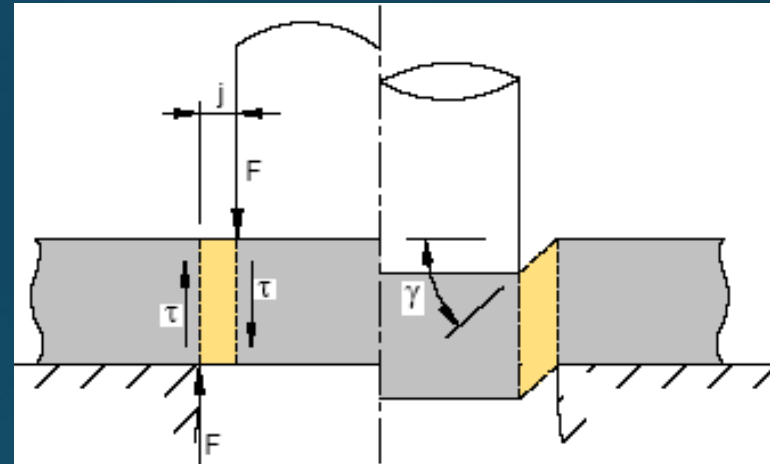
*Campo de aplicação: se destacam a dos transportes (automóvel aeroespacial e aeronáutica) a do mobiliário metálico, a dos eletrodomésticos e utensílios de cozinha e a da cunhagem de moeda ou medalhas (fabrico dos discos).*

# Corte de chapas

**Punção e matriz** definem os contornos interior do furo efetuados na chapa e exterior da peça.

**Folga** entre o punção e a matriz de 5 a 10% da espessura da chapa.

Processo de deformação plástica seguido de ruptura .



# Folga no corte de chapas metálicas

Distância entre a aresta de corte do punção e a aresta de corte da matriz

- Valores típicos variam entre 4% e 8% da espessura da peça
  - Se for muito pequena, linhas de fratura se cruzam, causando aumento do atrito e maior força
  - Se for muito grande, o metal é comprimido entre as arestas e o resultado é aumento da rebarba

# Folga no corte de chapas metálicas

- Folga Recomendada pode ser estimada através da relação:

$$l_f = a_f \times t$$

onde  $l_f$  = folga (mm);  $a_f$  = tolerância da folga;  $t$  = espessura da peça (mm).

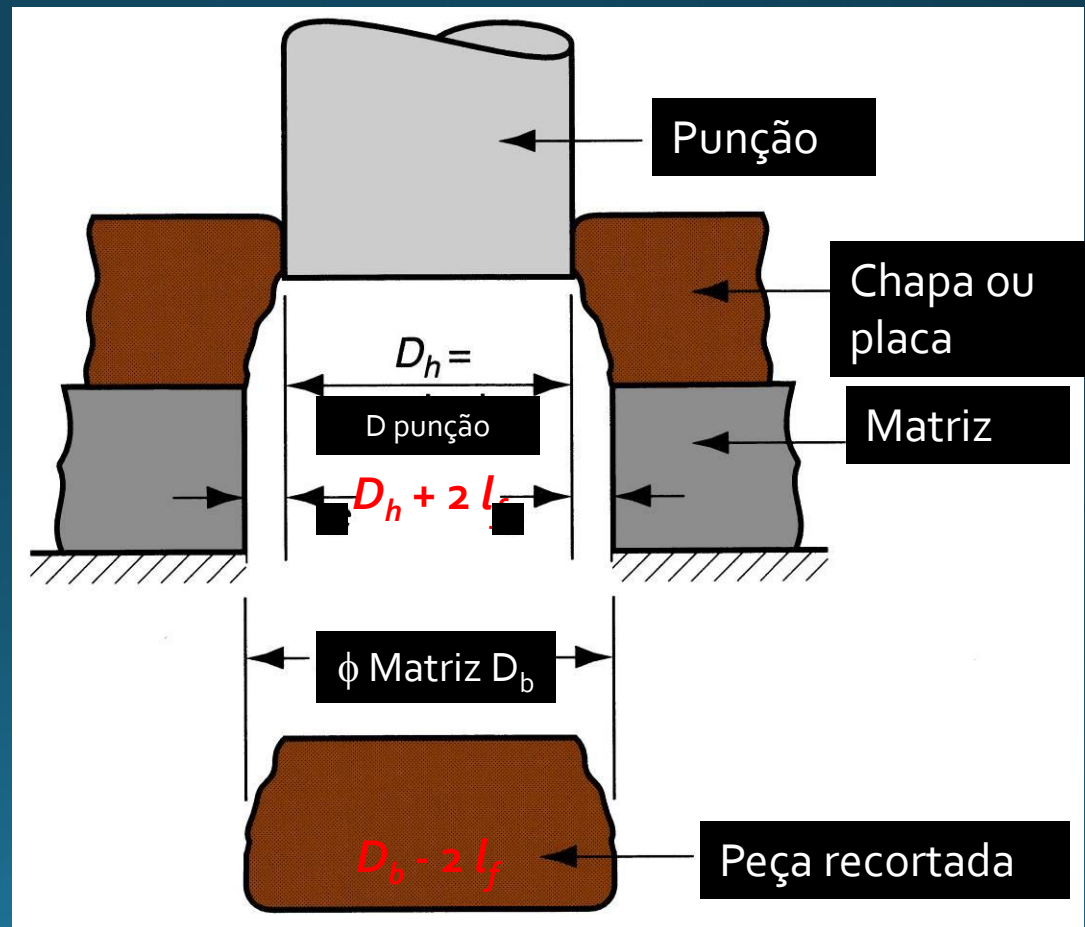
- Tolerância da folga  $a_f$  é determinada de acordo com o tipo de metal

# Tamanhos de Punções e Matrizes

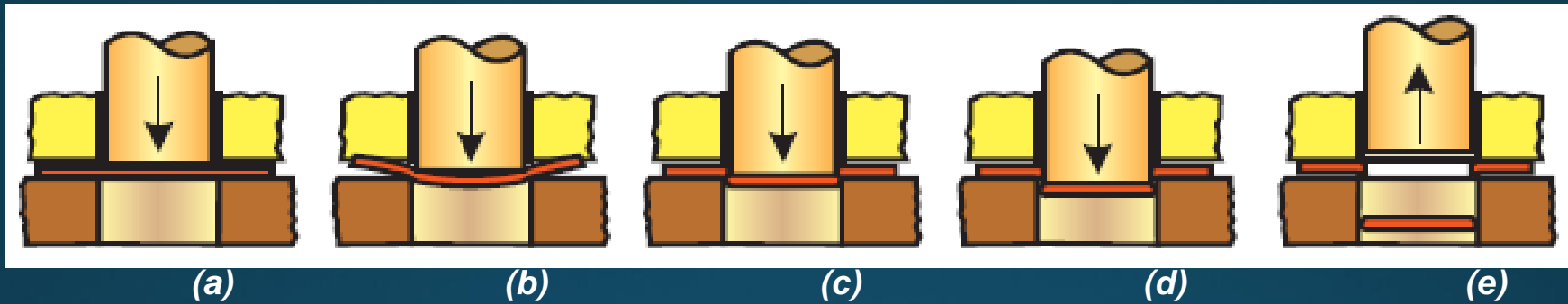
Diâmetro do Blank do Punção =  $D_b - 2 l_f$

Diâmetro do furo da Matriz =  $D_h + 2 l_f$

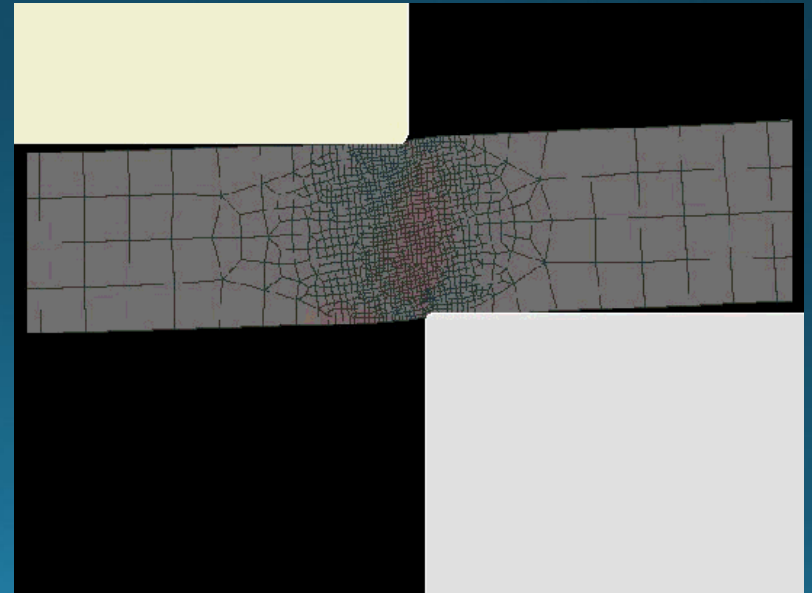
Tamanho da matriz determina o tamanho do Recorte (*Blank*)  $D_b$ ; tamanho do punção determina o tamanho do furo  $D_h$ ;  $l_f$  = folga



# Mecanismo corte



- a) *Contato entre o punção e a chapa*
- b) *Ligeira flexão no início da deformação*
- c) *Deformação plástica e abertura de fendas*
- d) *Separação completa da peça*
- e) *Extração da peça e inversão do movimento do punção*

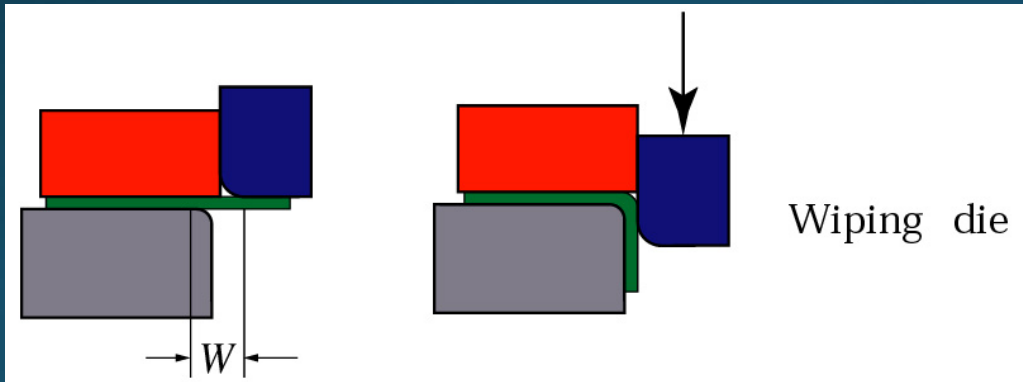
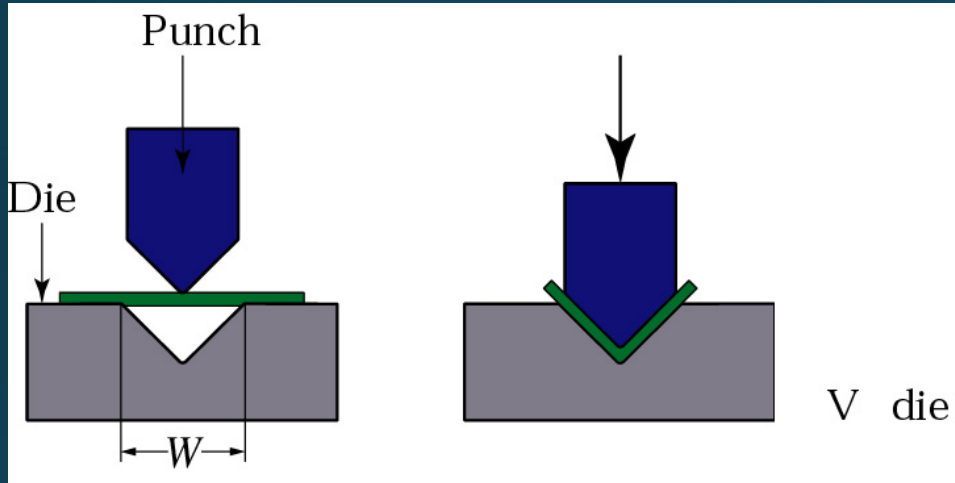




# Dobramento

- Conformar o objeto sem alterar a espessura da chapa, evitando alongamento e escoamento – necessidade de controle rigoroso das ferramentas e regulagem exata do curso da prensa.
- Evitar cantos vivos – imprudente executar raios de curvatura internos inferiores à espessura da chapa; as fibras externas seriam muito tracionadas e o material acabaria rasgando.

# Dobramento



# Dobramento

